中国生态农业学报 2016 年 1 月 第 24 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2016, 24(1): 112−120

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.150100

稻田复种轮作模式的生态经济效益综合评价*

杨滨娟 黄国勤** 陈洪俊 王淑彬

(江西农业大学生态科学研究中心 南昌 330045)

摘 要 为了筛选具有可持续性、适合鄱阳湖生态经济区的冬季绿色高效循环复合种植模式，通过 2012 年—2013 年连续 2 年的田间定位试验，采用 AHP 法和综合指数法对鄱阳湖生态经济区 5 种稻田复种轮作模式(冬闲–稻–稻→冬闲–早稻–晚稻，绿肥–早稻–晚稻→油菜–玉米||大豆–晚稻，油菜–玉米||大豆–晚稻，蚕豆–早稻–甘薯||玉米→蔬菜–甘蔗||大豆，蔬菜–甘蔗||大豆→绿肥–早稻–晚稻)的生态经济效益进行了综合评价。结果表明：按照晚稻价格比折算后，两年间各种植模式中蔬菜–甘蔗||大豆种植模式的作物产量最高，其次是绿肥–早稻–晚稻，蚕豆–早稻–甘薯||玉米的作物产量最低。生态经济效益综合评价表明，2012 年各系统的综合效益指数大小排序依次为：蔬菜–甘蔗||大豆>油菜–玉米||大豆–晚稻>蚕豆–早稻–甘薯||玉米>绿肥–早稻–晚稻>冬闲–早稻–晚稻，说明蔬菜–甘蔗||大豆种植模式“改稻为经”，是能够带动稻田高产高效的种植模式，有利于农业生产的可持续发展。2013 年经过稻田复种轮作后，各系统的综合效益指数表现为：绿肥–早稻–晚稻>蔬菜–甘蔗||大豆>油菜–玉米||大豆–晚稻>蚕豆–早稻–甘薯||玉米>冬闲–早稻–晚稻，表明稻田冬种紫云英模式的绿肥–早稻–晚稻种植模式能兼顾三大效益，有利于农业生产的可持续发展。从两年的综合效益结果来看，蔬菜–甘蔗||大豆→绿肥–早稻–晚稻模式能够带动稻田高产高效，能兼顾经济效益、生态效益和社会效益，可解决粮食安全和农业结构调整及农民增收等社会问题，而且对于冬季农业开发、自然资源的充分利用和农业生产的可持续发展也有极大的促进作用。综合来说，蔬菜–甘蔗||大豆→绿肥–早稻–晚稻模式是适合我国鄱阳湖生态经济区大面积推广应用的稻田冬季农业开发与复种轮作循环模式。

关键词 鄱阳湖生态经济区 稻田 复种轮作 生态经济效益 综合评价
中图分类号: S142; S344.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)01-0112-09

Comprehensive evaluation of eco-economic benefits of multi-crop rotation in paddy field systems*

YANG Binjuan, HUANG Guoqin**, CHEN Hongjun, WANG Shubin

(Research Center for Ecological Science, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract The study aimed to build sustainable application of evaluation index systems and methods and to select sustainable rotation patterns of multi-cropping with high efficiency green in the Poyang Lake Eco-Economic Zone. We conducted two consecutive years of field experiment and used a comprehensive index method to evaluate ecological and economic benefits of different rotation patterns of multi-cropping system in paddy fields. Based on the price of late rice, the results showed that crop yield of vegetables-sugar cane||soybean was the highest, followed by that of milk vetch-early rice-late rice and that of faba bean-early rice-sweet potato||maize the lowest. In 2012, the order of the overall efficiency index was vegetables-sugar cane||soybean > rapeseed-maize||soybean-late rice > faba bean-early rice-sweet potato||maize > milk vetch-early rice-late rice > winter fallow-early rice-late rice. This suggested that ‘vegetable-sugar cane||soybean’ intercropping pattern made rice production more economical as paddy fields supported high-yields with high efficiency. It was conducive for sustainable

* 国家科技支撑计划课题(2012BAD14B14-01)资助
** 通讯作者：黄国勤，研究方向为作物学、生态学、农业发展与区域农业、资源环境与可持续发展等。E-mail: hgqjxnc@sina.com
杨滨娟，研究方向为耕作制度与农业生态。E-mail: yangbinjuan27@sina.com
收稿日期: 2015−03−19 接受日期: 2015−10−12

* Supported by the National Key Technologies R &D Program of China (No. 2012BAD14B14-01)
** Corresponding author, E-mail: hgqjxnc@sina.com
Received Mar. 19, 2015; accepted Oct. 12, 2015

development of agricultural production. After multi-crop rotation, the order of the overall efficiency index for 2013 was milk vetch-early rice-late rice > vegetables-sugar cane||soybean > rapeseed-maize||soybean-late rice > faba bean-early rice-sweet potato||maize > winter fallow-early rice-late rice. The 'milk vetch-early rice-late rice' cropping pattern well accounted for the three main benefits conducive for sustainable agricultural production. Based on comprehensive benefits of the two-year experimental results, 'vegetables-sugar cane||soybean → milk vetch-rice-rice' cropping pattern had the highest efficiency and yield. It well accounted for social, ecological and economic benefits, favorable for food security and structural agricultural adjustment that in turn increased farmers' income and other socio-economic benefits. It was also critical for the promotion of agricultural development in winter, making full use of natural resources that resulted in sustainable agricultural production. In a conclusion, 'vegetables-sugar cane||soybean → milk vetch-early rice-late rice' was the best rotation pattern for winter agriculture and multi-crop rotation system in terms of the scale of application in paddy fields in Poyang Lake Eco-Economic Zone.

Keywords Poyang Lake eco-economic zone; Paddy field; Multi-crop rotation system; Eco-economic benefit; Comprehensive evaluation

江西是国家粮食重要产区和稳定的水稻生产基地，占全国水稻种植面积的 7.7%，产量占全国水稻产量的 9.8%，是我国的稻米大省[1]，对维护国家粮食安全作出了重要贡献。目前江西省稻田冬闲面积大，复种指数下降，且大多实行长期复种连作[2]，这对自然资源是极大的浪费，同时也降低了土壤肥力。面对上述问题，如何保持江西双季稻区的绿色高效可持续发展是重中之重。我国南方稻区水热资源丰富，多数地区适宜水稻或其他作物复种，以及种植冬季作物[3−4]。冬季绿肥适应性较强、生长迅速，是一种重要的、养分完全的优质生物肥源[5−6]，翻压后可促进土壤养分的循环与转化[7−11]，为土壤提供大量的碳源和养分[5]，对缓解化肥资源紧张及节约化肥投入成本[12]有良好的效果，也为稻田的循环利用作出了较大贡献[13]。

目前，有多种稻田冬季开发模式和效益不尽相同。正确评价不同种植模式的生态经济效益，筛选具有可持续性、适合区域特性的冬季绿色高效循环复合种植模式，在理论和生产实践上都具有重要的意义。由于种植模式生态经济效益的组成往往是多方位、多层次、多指标的，因此要准确、全面地评价不同种植模式的优劣，必须首先建立种植模式综合评价指标体系。王超[14]通过灰色关联分析法对稻田不同轮作系统的生态经济效益进行综合评价，结果表明：在稻田轮作系统中，以轮作处理(黑麦草–早稻–晚稻→紫云英–早稻–晚稻→黑麦草–中稻–紫云英×油菜–早稻–晚稻→黑麦草–早稻–晚稻→紫云英–早玉米–晚稻)的综合效益最佳，而连作处理的综合效益最差。前人众多研究都侧重于大范围、宏观的生态效益进行评价，对于稻田复种轮作系统下的生态效益评价研究较少。因此，在前人研究的基础上，通过田间试验，深入分析稻田冬季复种轮作模式的综合效益，构建可持续应用评价指标体系和评价方法，并筛选具有可持续性、适合鄱阳湖生态经济区冬季绿色高效循环复合种植模式，对于建立农田可持续的土壤管理和土地利用具有重要意义，为建立资源节约型新型农作制度以及实现农业的绿色高效可持续发展提供技术支撑和参考依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

研究区域位于江西省鄱阳湖生态经济区的余江县。该区气候温暖、土壤肥沃、排灌方便，适宜种植多种农作物和建立多种耕作制度[15]。试验于 2011 年 9 月—2013 年 11 月在余江县农业科学研究所试验基地进行。研究区属中亚热带温暖湿润季风气候区，具有四季分明、气候温和、雨量丰沛、日照充裕、无霜期长的特点。年平均气温 18.1 ℃，最热月(7 月)平均 29.7 ℃，最冷月(1 月)平均 5.6 ℃，年极端最高温度 41.0 ℃，年极端最低温度−15.1 ℃，≥0 ℃以上的正积温平均为 6 586.4 ℃，≥10 ℃的有效积温达 5 705.6 ℃；年平均降水量为 1 891.2 mm，平均降水日数 186 d，汛期(4—6 月)降水占全年的 48.13%，旱季(7—9 月)占 20%；太阳年辐射总量为 454.27 kJ·cm^{-2}。

1.2　田间试验设计与试验材料

1.2.1　试验设计

设计以下 5 种处理(复种轮作方式)，见表 1。3 次重复，共 15 个小区。每个试验小区面积 67 m^2 (10 m×6.7 m)，小区间田埂 0.5 m，水沟宽 1 m，环沟宽 0.5 m。试验前表层土壤(0~15 cm)肥力情况：pH 4.91，有机质 22.92 g·kg^{-1}，全氮 1.35 g·kg^{-1}，有效磷 37.39 mg·kg^{-1}，速效钾 133.20 mg·kg^{-1}，有机碳 13.29 g·kg^{-1}，C/N 比 9.84，阳离子交换量 4.70 cmol(+)·kg^{-1}。

1.2.2　供试材料

2012 年、2013 年早稻品种为‘中早 33’，晚稻为‘黄花占’，玉米(*Zea mays*)为‘赣糯 1 号’，大豆

表 1 不同处理的稻田复种轮作模式设计
Table 1 Design of different rotational-multiple cropping patterns of paddy field in the experiment

模式 Pattern	2012 年 Year 2012	2013 年 Year 2013
A(CK)	冬闲–早稻–晚稻 Fallow-early rice-late rice	冬闲–早稻–晚稻 Fallow-early rice-late rice
B	绿肥–早稻–晚稻 Milk vetch-early rice-late rice	油菜–玉米‖大豆–晚稻 Rapeseed-maize‖soybean-late rice
C	油菜–玉米‖大豆–晚稻 Rapeseed-maize‖soybean-late rice	蚕豆–早稻–甘薯‖玉米 Faba bean-early rice-sweet potato‖maize
D	蚕豆–早稻–甘薯‖玉米 Faba bean-early rice-sweet potato‖maize	蔬菜–甘蔗‖大豆 Vegetables-sugar cane‖soybean
E	蔬菜–甘蔗‖大豆 Vegetables-sugar cane‖soybean	绿肥–早稻–晚稻 Milk vetch-early rice-late rice

"–"表示接茬轮作, "‖"表示间作。"-" represents rotation of two crops, "‖" represents intercropping of two crops.

(*Glycine max*)为'菜豆 1 号', 甘薯(*Dioscorea esculenta*)、甘蔗(*Saccharum officinarum*)为本地品种, 冬季绿肥紫云英(*Astragalus sinicus*)品种为'余江大叶籽', 油菜(*Brassica campestris*)为'赣油 1 号', 蚕豆(*Vicia faba*)品种为'大粒 1 号', 蔬菜大蒜(*Allium sativum*)为山东白蒜。

1.2.3 种植方法

生长季作物田间管理: 2012 年早稻 3 月 26 日播种, 4 月 15 日抛秧, 7 月 10 日收获; 晚稻 6 月 10 日播种, 7 月 13 日抛秧, 11 月 3 日收获。2013 年早稻 3 月 23 日播种, 4 月 12 日抛秧, 7 月 13 日收获; 晚稻 6 月 12 日播种, 7 月 14 日抛秧, 11 月 5 日收获。2012 年甘蔗 3 月 20 日播种, 4 月 22 日移栽, 12 月 2 日收获; 玉米、大豆 4 月 22 日播种, 6 月 25 日收获; 甘薯 7 月 15 日栽插, 11 月 5 日收获。2013 年甘蔗 3 月 25 日播种, 4 月 15 日移栽, 12 月 6 日收获; 玉米、大豆 4 月 15 日播种, 6 月 20 日收获; 甘薯 7 月 18 日栽插, 11 月 10 日收获。

冬季作物田间耕作措施: 试验期间紫云英于每年 9 月底—10 月初撒播, 油菜、蚕豆、蔬菜于每年晚稻收获后 11 月中旬播种, 次年早稻移栽前 15 d 全部测产、翻压还田, 在翻耕前喷施一次克无踪进行除草。紫云英播种量为 37.5 $kg\cdot hm^{-2}$, 油菜播种量为 7.5 $kg\cdot hm^{-2}$。紫云英播种后, 立即灌水, 保持浅水层 2 d, 其他措施同常规田间管理。油菜施钙镁磷肥 150 $kg\cdot hm^{-2}$(基肥), 氯化钾 250 $kg\cdot hm^{-2}$、尿素 80 $kg\cdot hm^{-2}$(追肥)。蚕豆施钙镁磷肥 375 $kg\cdot hm^{-2}$(基肥), 氯化钾 75 $kg\cdot hm^{-2}$、尿素 75 $kg\cdot hm^{-2}$(基肥∶追肥=1∶2)。紫云英不施肥。紫云英、油菜、蚕豆、蔬菜成熟期均作肥料还田。

早晚稻施肥情况: 早、晚稻所用化肥为尿素(N 46%)、钙镁磷肥(P_2O_5 12%)和氯化钾(K_2O 60%), 周年常规用量为 N∶P_2O_5∶K_2O=150 $kg\cdot hm^{-2}$∶90 $kg\cdot hm^{-2}$∶120 $kg\cdot hm^{-2}$。氮肥早稻按基肥∶分蘖肥∶穗肥=6∶3∶1 施用, 晚稻按基肥∶分蘖肥∶穗肥=5∶3∶2 施用。磷肥全部作基肥, 一次性施入。钾肥按分蘖肥∶穗肥=7∶3 施用。氮磷基肥在插秧前一天施下, 分蘖肥在水稻移栽后 5~7 d 时施用, 穗肥在主茎幼穗长 1~2 cm 时施用。其他栽培管理方法同一般大田。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 作物产量

为了统一比较不同作物产量, 按照各种作物所形成的经济产量, 以原粮折算标准计算产量作对比分析。水稻于成熟期分小区单打实收测产; 玉米于成熟期采用五点取样法每小区采集 20 个玉米棒脱粒晒干后称重, 作为实测产量; 大豆于成熟期每小区采集 20 株大豆, 除去豆荚晒干后称重, 作为实测产量; 甘薯于成熟期每小区采集 20 个, 洗净晒干后称重, 作为实测产量; 甘蔗于成熟期每小区采集 5 株称重, 作为实测产量。紫云英、油菜、蚕豆、蔬菜等冬季绿肥在成熟期, 采用五点取样法, 每点测 1 m^2, 测其鲜重。

1.3.2 综合效益评价因子权重及综合评价方法的确定

记载农田各种物质投入及用工投入量, 记载农田各种产品产出量, 根据农产品价格的变化, 计算物质、能量的投入产出状况, 并采用 AHP 法和综合指数法分别确立指标权重和进行综合评价。

双季稻田冬季复种轮作系统的综合效益[16]即经济效益、生态效益和社会效益三大效益的综合。为满足评价因素的科学性和完备性, 可采用频度统计、理论分析、专家咨询等方法设置、筛选因子[17], 将初步建立起来的具体因素因子进行主成分分析, 对影响微小或不太关联的指标进行合并或者淘汰, 最后选择出内涵丰富并且在实践中简便实用的因素, 最终构成最终评价因素指标体系。

为确保因子权重的科学性, 在对稻田冬季复种轮作系统综合效益评价中, 结合已有的资料和其他研究者的经验, 采用层次分析法(AHP 法)确定各因子权重。

通过筛选后的指标体系和采用 AHP 法计算得到的各指标权重见表 2。

本文采用综合指数法对稻田冬季复种轮作系统的效益进行综合评价。其计算公式为：

$$V_i = \sum W_j F_j(X_i) \quad (1)$$

式中：V_i 为综合效益的综合评价指数，W_j 为第 j 个指标的权重，$F_j(X_i)$ 为第 j 个指标的评价函数。

在评价过程中，由于各指标的量纲不同，所以不能直接将指标权重和指标观测值相乘来求综合指数。为此本文采用标准化将各指标的观测值变换到同一水平上，消除其量纲的影响，这种变换称为指标 X_i 观测值的评价函数 $F_j(X_i)$，即 $F_j(X_i) = X_{ij} / X_{j\max}$。

表 2　稻田复种轮作系统综合效益评价指标权重

Table 2　Indexes and their weights for comprehensive benefits evaluation of different rotational-multiple cropping patterns in paddy field

目标层 Target layer	准则层和权重 Standard layer and weight	指标和权重 Index and weight
综合效益评价 Comprehensive benefit evaluation	经济效益 Economic benefits (0.437 6)	经济总产值　Total economic output (0.065 6)
		纯产值　Net output (0.1094)
		物资费用出益率　Material cost-benefit rate (0.087 5)
		经济产投比　Economic output-input ratio (0.175 1)
	生态效益 Ecological benefits (0.341 8)	氮素产投比　Nitrogen output-input ratio (0.095 7)
		有机质　Organic matter (0.078 6)
		土地当量比　Land equivalent ratio (0.020 5)
		养地作物指数　Soil fertility maintenance crop index (0.030 8)
		光能利用率　Solar energy utilization rate (0.081 3)
		辅助能效率　Auxiliary energy efficiency (0.034 9)
	社会效益 Social benefits (0.220 6)	劳动净产值率　Labor net output rate (0.044 1)
		科技进步贡献率　Technological advancement contribution rate (0.066 2)
		粮食产量　Grain yield (0.110 3)

1.4　数据处理

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 处理，采用 AHP 法和综合指数法分别确立指标权重和进行综合评价。

2　结果与分析

2.1　稻田冬季复种轮作模式对作物产量的影响

稻田冬季复种轮作模式下作物产量对比如表 3 所示。通过分析相同作物不同处理可以看出，2012 年和 2013 年早、晚稻产量均是绿肥–早稻–晚稻(2012 年为处理 B，2013 年为处理 E)高于连作处理 A(冬闲–早稻–晚稻)，分别高出 1.6%、4.4%和 1.8%、3.3%。比较不同间作方式中的玉米产量可以看出，连续两年大豆间作玉米(2012 年为处理 C，2013 年为处理 B)的玉米产量比甘薯间作玉米(2012 年为处理 D，2013 年为处理 C)中的玉米产量分别高 12.5%和 8.6%。比较不同间作方式中的大豆产量可以看出，连续两年玉米间作大豆(2012 年处理 C、2013 年处理 B)的大豆产量比甘蔗间作大豆(2012 年处理 E、2013 年处理 D)中的大豆产量分别高 80.6%和 84.5%，这可能与田间作物设置及甘蔗长势有关，对于大豆的生长会造成一定的影响。由此可以看出，玉米大豆间作种植模式中玉米大豆均能取得较高的作物产量。

另外，为了进行不同作物间的产量比较，把玉米、大豆、甘薯、甘蔗、早稻产量按照晚稻价格比折算，可以看出 2012 年折产后各种植模式大小顺序依次为：E>B>A>C>D，蔬菜–甘蔗||大豆种植模式的作物产量最高，分别比其他处理高 8.2%、11.5%、33.0%和 38.1%，且与处理 C(油菜–玉米||大豆–晚稻)、D(蚕豆–早稻–甘薯||玉米)差异显著(P<0.05)，蚕豆–早稻–甘薯||玉米的作物产量最低；2013 年折产后各种植模式大小顺序依次为：D>E>A>B>C，与 2013 年趋势一致，也是蔬菜–甘蔗||大豆种植模式的作物产量最高，且与其他处理间差异显著(P<0.05)，其次是绿肥–早稻–晚稻种植模式，蚕豆–早稻–甘薯||玉米的作物产量最低。甘薯玉米间作系统产量低可能是由于甘薯属喜光的短日照作物，日照充足、气温和地温高、温差较大时，对养分的制造、运转、贮存都有利，但甘薯不耐荫蔽，与高秆作物间作套种，易致减产；又或者是因为甘薯生长期内雨量较多，小区内排水不及时，导致土壤湿度过大，其产量、品质受到一定的影响。

表 3 稻田不同复种轮作模式下作物产量对比

Table 3 Crop yields of different rotational-multiple cropping patterns in paddy field kg·hm^{-2}

年份 Year	处理 Treatment	玉米 Corn	大豆 Soybean	甘薯 Sweet potato	甘蔗 Sugar cane	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	折产 1) Converted yield
2012	A	—	—	—	—	7 775.0±111.5	8 575.0±213.7	15 794.64±330.2a2)
	B	—	—	—	—	7 900.0±238.0	8 950.0±320.8	16 285.71±201.5a
	C	3 635.5±174.9	692.7±47.5	—	—	—	8 900.0±108.4	13 239.46±267.4b
	D	3 233.0±223.1	—	3 800.4±141.0	—	8 000.0±203.7	—	12 758.29±283.0b
	E	—	383.5±9.3	—	31 750.0±334.8	—	—	17 614.31±311.4a
2013	A	—	—	—	—	7 050.0±240.9	8 275.0±132.4	15 168.33±345.2b
	B	3 450.8±125.2	731.2±26.8	—	—	—	8 470.0±123.6	12 799.57±274.0c
	C	3 178.6±182.3	—	3 589.4±223.2	—	6 375.0±301.5	—	11 882.39±215.8c
	D	—	396.4±12.6	—	29 575.5±283.5	—	—	18 113.48±225.9a
	E	—	—	—	—	7 175.0±174.9	8 550.0±256.0	15 565.56±304.6b

1)根据价格比折算成的晚稻产量。2012 年南昌市场早稻平均价格为 2.60 Yuan·kg^{-1}，晚稻平均价格为 2.80 Yuan·kg^{-1}，玉米平均价格为 2.50 Yuan·kg^{-1}，大豆平均价格为 4.42 Yuan·kg^{-1}，甘薯平均价格为 1.8 Yuan·kg^{-1}，甘蔗平均价格为 1.5 Yuan·kg^{-1}；2013 年南昌市场早稻平均价格为 2.64 Yuan·kg^{-1}，晚稻平均价格为 2.70 Yuan·kg^{-1}，玉米平均价格为 2.54 Yuan·kg^{-1}，大豆平均价格为 4.0 Yuan·kg^{-1}，甘薯平均价格为 2.0 Yuan·kg^{-1}，甘蔗平均价格为 1.6 Yuan·kg^{-1}。2)同列不同小写字母表示不同处理间差异达显著水平(P<0.05)，表中数据为平均值±标准差。1) Converted yield is late rice yield converted from different crops yield according to price ratio. In Nanchang market, the average prices of early rice, late rice, corn, soybean, sweet potato, sugar cane were 2.60 Yuan·kg^{-1}, 2.80 Yuan·kg^{-1}, 2.50 Yuan·kg^{-1}, 4.42 Yuan·kg^{-1}, 1.8 Yuan·kg^{-1}, 1.5 Yuan·kg^{-1} in 2012, respectively; and were 2.64 Yuan·kg^{-1}, 2.70 Yuan·kg^{-1}, 2.54 Yuan·kg^{-1}, 4.0 Yuan·kg^{-1}, 2.0 Yuan·kg^{-1}, 1.6 Yuan·kg^{-1} in 2013, respectively. 2) Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among different treatments at 0.05 level. The same as Table 2. Values in the table are means ± SD.

2.2 稻田冬季复种轮作系统效益的综合评价

经过评价指标筛选、指标权重确定后，利用综合指数法对稻田冬季复种轮作系统进行评价。各种植系统综合效益评价指标的初始值如表 4 所示。1)2012 年经济总产值、纯产值、土壤有机质含量、养地作物指数和粮食产量均以处理 E(蔬菜–甘蔗||大豆)表现最为显著，物资费用出益率、经济产投比、辅助能效率、劳动净产值率和科技进步贡献率均以处理 C(油菜–玉米||大豆–晚稻)表现最好，而处理 B(绿肥–早稻–晚稻)的氮素产投比达到最大，土地当量比和光能利用率以处理 D(蚕豆–早稻–甘薯||玉米)表现最好。2)2013 年经济总产值、纯产值、物资费用出益率、经济产投比、土地当量比、光能利用率和科技进步贡献率均以处理 B(油菜–玉米||大豆–晚稻)表现最好，有机质、养地作物指数和粮食产量以处理 D(蔬菜–甘蔗||大豆)表现最为显著，氮素产投比和劳动净产值率以处理 E(绿肥–早稻–晚稻)表现最好，而处理 B 的辅助能效率达到最大。

通过表 4 和表 5 中的数值计算可得出稻田冬季复种轮作系统综合效益的评价指数，如表 6 所示，2012 年各处理的单项效益指数：经济效益表现为 E(蔬菜–甘蔗||大豆)>C(油菜–玉米||大豆–晚稻)>D(蚕豆–早稻–甘薯||玉米)>B(绿肥–早稻–晚稻)>A(冬闲–早稻–晚稻)，生态效益为 E>D>C>B>A，社会效益为 E>B>C>D>A。然而单项效益指数只能反映某一方面的效益功能，难以反映稻田生态系统的综合效益[19]，如果仅仅根据单项效益指数进行评价，将得出不同的结论。而综合效益指数能更好反映各系统的整体效益功能，它能将各单项效益结合在一起，通过综合指数加以排序或判别，从而能够科学客观的对稻田生态系统进行评价。各系统的综合效益指数大小排序表现为：E>C>D>B>A。由此可以说明 2012 年蔬菜–甘蔗||大豆种植模式“改稻为经”，是能够带动稻田高产高效的种植模式，有利于农业生产的可持续发展。

2013 年各处理的单项效益指数：经济效益表现为 B(油菜–玉米||大豆–晚稻)>E(绿肥–早稻–晚稻)>C(蚕豆–早稻–甘薯||玉米)>D(蔬菜–甘蔗||大豆)>A(冬闲–早稻–晚稻)，生态效益为 E>D>B>C>A，社会效益为 D>E>B>C>A。各系统的综合效益指数大小排序表现为：E>D>B>C>A。由此可以说明稻田冬种紫云英模式“绿肥–早稻–晚稻”种植模式能兼顾三大效益(经济效益、生态效益、社会效益)，有利于农业生产的可持续发展。综合两年的结果来看，蔬菜–甘蔗||大豆→绿肥–早稻–晚稻的稻田复种轮作模式综合效益最为显著。

3 讨论

近年来，国内外许多学者分别从经济效益、生态效益和社会效益三方面对生态系统的综合效益评

表 4　稻田不同复种轮作系统的综合效益评价指标原始值

Table 4　Raw data of comprehensive benefits evaluation indexes of different rotational-multiple cropping patterns in paddy field

年份 Year	指标 Index	模式 Patterns				
		A(CK)	B	C	D	E
2012	经济总产值 Total economic output (Yuan·hm^{-2})	16 905.50	17 800.00	18 070.48	18 723.22	19 320.07
	纯产值 Net output (Yuan·hm^{-2})	11 930.78	12 844.08	14 450.31	13 045.14	14 882.06
	物资费用出益率 Material cost benefit rate	3.22	3.46	3.78	3.63	3.71
	经济产投比 Economic output-input ratio	2.82	2.94	3.12	3.05	3.08
	氮素产投比 Nitrogen output-input ratio	0.55	0.81	0.77	0.75	0.63
	有机质增加比 Increased ratio of organic matter (%)	1.21	9.19	10.48	18.09	39.84
	土地当量比 Land equivalent ratio	2.21	2.39	2.54	2.76	2.63
	养地作物指数 Crop index of maintaining soils	0.100	0.400	0.525	0.525	0.667
	光能利用率 Solar energy utilization rate (%)	1.11	1.14	1.26	1.28	1.27
	辅助能效率 Auxiliary energy efficiency (%)	3.66	3.82	3.85	3.79	3.81
	劳动净产值率 Labor net output rate (Yuan·d^{-1})	63.70	61.25	79.33	71.65	74.59
	科技进步贡献率 Technological advancement contribution rate (%)	0	77.11	82.78	80.14	78.62
	粮食产量 Grain yield (kg·hm^{-2})	15 794.64	16 285.71	13 289.46	12 758.29	17 614.31
2013	经济总产值 Total economic output (Yuan·hm^{-2})	17 085.42	19 535.11	18 070.48	18 723.44	18 870.34
	纯产值 Net output (Yuan·hm^{-2})	12 115.62	14 638.50	13 904.22	13 945.14	14 174.46
	物资费用出益率 Material cost benefit rate	3.25	3.81	3.64	3.65	3.76
	经济产投比 Economic output-input ratio	2.82	3.17	3.09	3.02	3.11
	氮素产投比 Nitrogen output-input ratio	0.55	0.74	0.70	0.68	0.80
	有机质增加比 Increased ratio of organic matter (%)	19.09	29.08	30.47	51.55	41.27
	土地当量比 Land equivalent ratio	2.25	2.79	2.54	2.72	2.68
	养地作物指数 Crop index of maintaining soils	0.100	0.525	0.525	0.667	0.400
	光能利用率 Solar energy utilization rate (%)	1.18	1.29	1.23	1.25	1.28
	辅助能效率 Auxiliary energy efficiency (%)	3.68	3.83	3.87	3.78	3.83
	劳动净产值率 Labor net output rate (Yuan·d^{-1})	65.03	75.25	63.57	75.10	79.64
	科技进步贡献率 Technological advancement contribution rate (%)	0	84.09	79.65	80.67	82.11
	粮食产量 Grain yield (kg·hm^{-2})	15 168.33	12 799.57	11 882.39	18 113.48	15 565.56

表中数据未扣除农业税；“有机质增加比”为各系统与试验前(20.917 g·kg^{-1})相比增长百分比值；光能利用率=有机物所含能量/土地所接受的太阳能；劳动净产值率=净产值/劳动消耗，劳动力价格为 100 Yuan·d^{-1}·人$^{-1}$；农业科技进步贡献率＝农业科技年均增长率/农业总产值年均增长率(表中 CK 处理由于没有采取其他耕作措施，计算其科技年均增长率为 0)。其他数据折算参照《中国耕作学》[18]和《农业生态学》[19]。The data in the table were not deducted from the agricultural tax. The ‘increased ratio of organic matter’ was the change percentage of different patterns compared with that before the experiment (20.917 g·kg^{-1}). Solar energy utilization rate = solar energy contained in organic matter / total solar energy of the land. Net labor output rate = net output / consumption of labor, the labor price was 100 Yuan per day for per labor. Technology advancement contribution rate = annual growth rate of agricultural science and technology / annual growth rate of total agricultural output value. CK treatment was not taking any advanced technology, the annual growth rate of agricultural science and technology was 0. Other data conversion referred to the “Geoponics in China”[18] and “Agroecology”[19].

价进行了大量的研究。黄国勤等[20]试验结果表明，稻田轮作系统的总初级生产力、光能利用率、辅助能利用率分别比连作系统高 17.47%、9.87%和 5.0%。氮、磷、钾的养分利用率也同样明显高于连作系统。朱清海[21]研究了稻田养殖泥鳅时的物流和能流特征等，结果表明，稻–泥鳅田生态系统有机能输入占人工辅助能输入的 49.13%，比普通稻田生态系统提高了 21.12%；光能利用率、能量转换率比普通稻田生态系统分别提高 0.04%和 0.13%；氮磷钾输入输出比与普通稻田生态系统相等为 1.0，为发展新型循环农业提供了科学依据。纵观前人研究，我国的稻田生态系统评价研究主要涉及评价指标体系及其选择原则、指标权重的确定方法以及综合评价方法等[22–24]，突出了综合评价和定量方法，可操作性强，因而得到了广泛的应用。稻田轮作系统的综合评价是对稻田轮作系统的社会、经济、生态效益进行综合分析和评价。

本研究采用综合指数法对稻田冬季复种轮作系统的效益进行综合评价，2012 年各系统的综合效益指数大小排序依次为：蔬菜–甘蔗||大豆>油菜–玉米||

表 5 稻田不同复种轮作系统的综合效益评价指标的无量纲化值

Table 5 No dimension values of indexes for comprehensive benefits evaluation of different rotational-multiple cropping patterns in paddy field

年份 Year	指标 Index	模式 Pattern				
		A(CK)	B	C	D	E
2012	经济总产值 Total economic output	0.875 0	0.921 3	0.935 3	0.969 1	1.000 0
	纯产值 Net output	0.801 7	0.863 1	0.971 0	0.876 6	1.000 0
	物资费用出益率 Material cost benefit rate	0.851 9	0.915 3	1.000 0	0.960 3	0.981 5
	经济产投比 Economic output-input ratio	0.903 8	0.942 3	1.000 0	0.977 6	0.987 2
	氮素产投比 Nitrogen output-input ratio	0.679 0	1.000 0	0.950 6	0.925 9	0.777 8
	有机质增加比 Increased ratio of organic matter	0.030 4	0.230 7	0.263 1	0.454 1	1.000 0
	土地当量比 Land equivalent ratio	0.800 7	0.865 9	0.920 3	1.000 0	0.952 9
	养地作物指数 Crop index of maintaining soils	0.149 9	0.599 7	0.787 1	0.787 1	1.000 0
	光能利用率 Solar energy utilization rate	0.867 2	0.890 6	0.984 4	1.000 0	0.992 2
	辅助能效率 Auxiliary energy efficiency	0.950 6	0.992 2	1.000 0	0.984 4	0.989 6
	劳动净产值率 Labor net output rate	0.803 0	0.772 1	1.000 0	0.903 2	0.940 2
	科技进步贡献率 Technological advancement contribution rate	0.000 0	0.931 5	1.000 0	0.968 1	0.949 7
	粮食产量 Grain yield	0.896 7	0.924 6	0.754 5	0.724 3	1.000 0
2013	经济总产值 Total economic output	0.874 6	1.000 0	0.925 0	0.958 5	0.966 0
	纯产值 Net output	0.827 7	1.000 0	0.949 8	0.952 6	0.968 3
	物资费用出益率 Material cost benefit rate	0.853 0	1.000 0	0.955 4	0.958 0	0.986 9
	经济产投比 Economic output-input ratio	0.889 6	1.000 0	0.974 8	0.952 7	0.981 1
	氮素产投比 Nitrogen output-input ratio	0.687 5	0.925 0	0.875 0	0.850 0	1.000 0
	有机质增加比 Increased ratio of organic matter	0.370 3	0.564 1	0.591 1	1.000 0	0.800 6
	土地当量比 Land equivalent ratio	0.806 5	1.000 0	0.910 4	0.974 9	0.960 6
	养地作物指数 Crop index of maintaining soils	0.149 9	0.787 1	0.787 1	1.000 0	0.599 7
	光能利用率 Solar energy utilization rate	0.914 7	1.000 0	0.953 5	0.969 0	0.992 2
	辅助能效率 Auxiliary energy efficiency	0.950 9	0.989 7	1.000 0	0.976 7	0.989 7
	劳动净产值率 Labor net output rate	0.816 5	0.944 9	0.798 2	0.943 0	1.000 0
	科技进步贡献率 Technological advancement contribution rate	0.000 0	1.000 0	0.947 2	0.959 3	0.976 5
	粮食产量 Grain yield	0.837 4	0.706 6	0.656 0	1.000 0	0.859 3

表 6 稻田不同复种轮作系统的综合效益评价结果

Table 6 Comprehensive benefits evaluation results of different rotational-multiple cropping patterns in paddy field

年份 Year	模式 Pattern	经济效益指数 Economic benefit index	生态效益指数 Ecological benefit index	社会效益指数 Social benefit index	综合效益指数 Comprehensive benefits index	综合效益排名 Comprehensive benefits rank
2012	A(CK)	0.377 9	0.192 1	0.134 3	0.704 3	5
	B	0.399 9	0.257 1	0.197 7	0.854 7	4
	C	0.430 2	0.269 7	0.193 5	0.893 4	2
	D	0.414 7	0.284 7	0.183 8	0.883 2	3
	E	0.433 7	0.318 6	0.214 6	0.966 9	1
2013	A(CK)	0.378 3	0.223 6	0.128 4	0.730 3	5
	B	0.437 6	0.293 4	0.185 8	0.916 8	3
	C	0.418 9	0.285 5	0.170 3	0.874 7	4
	D	0.417 7	0.323 6	0.215 4	0.956 7	2
	E	0.427 4	0.328 0	0.203 5	0.958 9	1

大豆–晚稻>蚕豆–早稻–甘薯||玉米>绿肥–早稻–晚稻>冬闲–早稻–晚稻，说明蔬菜–甘蔗||大豆种植模式“改稻为经”，是能够带动稻田高产高效的种植模式，有利于农业生产的可持续发展。2013 年表现为:

绿肥–早稻–晚稻>蔬菜–甘蔗||大豆–油菜–玉米||大豆–晚稻>蚕豆–早稻–甘薯||玉米>冬闲–早稻–晚稻，表明稻田冬种紫云英的绿肥–早稻–晚稻种植模式能兼顾三大效益(经济效益、生态效益、社会效益)，有利于农业生产的可持续发展。本研究中模式 E 为蔬菜–甘蔗||大豆→绿肥–早稻–晚稻的轮作模式，故模式 E 是适合我国鄱阳湖生态经济区大面积推广应用的稻田冬季农业开发与复种轮作循环体系。但是中国是一个以农业为基础的发展中国家，由于地域环境差异和长期的作物栽培历史，很难形成具有普遍意义的农田生态系统综合效益评价指标体系，无法对各案例的研究方法和评价结果进行横向比较，不利于解决统一评价方法等理论问题，这也是本文的不足之处。因此为了获得更加普遍的规律，利用相同的功能价值评价体系对其他地区相同的稻田种植模式进行定位研究也是下一步需要考虑的问题。

4　结论

利用综合指数法对稻田冬季复种轮作系统的效益进行综合评价，结果表明蔬菜–甘蔗||大豆→绿肥–早稻–晚稻的两年复种轮作“改稻为经”种植模式，是能够带动稻田高产高效的种植模式，不仅能兼顾三大效益(经济效益、生态效益和社会效益)，考虑了粮食安全和农业结构调整及农民增收等社会问题，而且对于冬季农业开发、自然资源的充分利用和农业生产的可持续发展也有极大的促进作用，是适合我国鄱阳湖生态经济区大面积推广应用的稻田冬季农业开发与复种轮作循环体系。

参考文献　References

[1] 王立祥，廖允成．中国粮食问题：中国粮食生产能力提升及战略储备[M]．沈阳：阳光出版社, 2012
Wang L X, Liao Y C. Chinese Food Problem: China’s Grain Production Capacity Enhancement and Strategic Reserve[M]. Shenyang: Sunshine Press, 2012

[2] 黄国勤．南方稻田耕作制度可持续发展面临的十大问题[J]．耕作与栽培, 2009(3): 1–2
Huang G Q. Ten questions faced farming systems for sustainable development in the southern paddy fields[J]. Tillage and Cultivation, 2009(3): 1–2

[3] 张珺穜，曹卫东，徐昌旭，等．种植利用紫云英对稻田土壤微生物及酶活性的影响[J]．中国土壤与肥料，2012(1): 19–25
Zhang J T, Cao W D, Xu C X, et al. Effects of incorporation of milk vetch (*Astragalus sinicus*) on microbial populations and enzyme activities of paddy soil in Jiangxi[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2012(1): 19–25

[4] 谭淑豪．南方冬闲田季节性规模经营模式分析[J]．农业经济问题, 2010(5): 62–65
Tan S H. The strategic significance of developing winter fallow farmland in southern China and seasonal scale management mode and development strategy[J]. Issues in Agricultural Economy, 2010(5): 62–65

[5] 杨曾平，徐明岗，聂军，等．长期冬种绿肥对双季稻种植下红壤性水稻土质量的影响及其评价[J]．水土保持学报, 2011, 25(3): 92–97
Yang Z P, Xu M G, Nie J, et al. Effect of long-term winter planting-green manure on reddish paddy soil quality and its comprehensive evaluation under double-rice cropping system[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(3): 92–97

[6] 展茗，曹凑贵，江洋，等．不同稻作模式下稻田土壤活性有机碳变化动态[J]．应用生态学报, 2010, 21(8): 2010–2016
Zhan M, Cao C G, Jiang Y, et al. Dynamics of active organic carbon in a paddy soil under different rice farming modes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(8): 2010–2016

[7] 李正，刘国顺，叶协锋，等．绿肥翻压年限对植烟土壤微生物量 C、N 和土壤 C、N 的影响[J]．江西农业学报，2010, 22(4): 62–65
Li Z, Liu G S, Ye X F, et al. Effects of different years of burying green manure on soil microbial biomass C, N and C, N content in soil[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2010, 22(4): 62–65

[8] 李继明，黄庆海，袁天佑，等．长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响[J]．植物营养与肥料学报，2011, 17(3): 563–570
Li J M, Huang Q H, Yuan T Y, et al. Effects of long-term green manure application on rice yield and soil nutrients in paddy soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(3): 563–570

[9] Manna M C, Swarup A, Wanjari R H, et al. Long-term effect of fertilizer and manure application on soil organic carbon storage, soil quality and yield sustainability under sub-humid and semi-arid tropical India[J]. Field Crops Research, 2005, 93(2/3): 264–280

[10] 杨曾平，高菊生，郑圣先，等．长期冬种绿肥对红壤性水稻土微生物特性及酶活性的影响[J]．土壤，2011，43(4): 576–583
Yang Z P, Gao J S, Zheng S X, et al. Effects of long-term winter planting-green manure on microbial properties and enzyme activities in reddish paddy soil[J]. Soils, 2011, 43(4): 576–583

[11] 潘福霞，鲁剑巍，刘威，等．三种不同绿肥的腐解和养分释放特征研究[J]．植物营养与肥料学报, 2011, 17(1): 216–223
Pan F X, Lu J W, Liu W, et al. Study on characteristics of decomposing and nutrients releasing of three kinds of green manure crops[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1): 216–223

[12] 林忠辉，陈同斌，周立祥．中国不同区域化肥资源利用特征与合理配置[J]．资源科学, 1998, 20(5): 26–31
Lin Z H, Chen T B, Zhou L X. Characteristics of the application of chemical fertilizers and their rational allocation in China[J]. Resources Science, 1998, 20(5): 26–31

[13] 刘彬彬. 基于能值理论的江南丘陵区双季稻田多熟种植模式生态效益研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2012
Liu B B. Analysis on ecology benefit in double paddy field of multiple cropping based on emergy theory in southern hilly areas of China[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2012

[14] 王超. 双季稻田复种轮作系统的综合效益研究及评价[D]. 南昌: 江西农业大学, 2008
Wang C. Research and evaluation on comprehensive benefits of multiple cropping rotation systems in double paddy field[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2008

[15] 熊传伟, 黄国勤, 吴孙娟. 鄱阳湖及周边经济区稻田耕作制度的现状调查及综合评价——以余江县为例[J]. 耕作与栽培, 2007(1): 1–2
Xiong C W, Huang G Q, Wu S J. Investigation and comprehensive evaluation on cropping systems in paddy field of Poyang Lake and its surrounding Economic Zone — A case study of Yujiang County[J]. Tillage and Cultivation, 2007(1): 1–2

[16] 姚珍. 保护性耕作对水稻生长和稻田环境质量的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2007
Yao Z. The influence of conservation tillage on paddy rice growth and paddy environment quality[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2007

[17] 陈杰, 胡秉民. 德清县生态农业建设综合评价[J]. 应用生态学报, 2003, 14(8): 1317–1321
Chen J, Hu B M. Integrated evaluation of eco-agricultural practices in Deqing County, Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(8): 1317–1321

[18] 黄国勤. 中国耕作学[M]. 北京: 新华出版社, 2001
Huang G Q. Geoponics in China[M]. Beijing: Xinhua Press, 2001

[19] 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001
Luo S M. Agroecology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2001

[20] 黄国勤, 熊云明, 钱海燕, 等. 稻田轮作系统的生态学分析[J]. 生态学报, 2006, 26(4): 1159–1164
Huang G Q, Xiong Y M, Qian H Y, et al. Ecological analysis on crop rotation systems of paddy field[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(4): 1159–1164

[21] 朱清海. 稻–泥鳅田生态系统能流、物流和效益分析[J]. 中国稻米, 1997(1): 26–28
Zhu Q H. Analysis on energy-nutrient flow and benefit of paddy field-loach field ecosystem[J]. China Rice, 1997(1): 26–28

[22] 周国强, 严新平. 经济系统综合经济效益评价方法比较[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2002, 26(2): 188–190
Zhou G Q, Yan X P. A comparison among parameters of synthetical economic effect in a system[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2002, 26(2): 188–190

[23] 李崧, 邱微, 赵庆良, 等. 层次分析法应用于黑龙江省生态环境质量评价研究[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 1031–1034
Li S, Qiu W, Zhao Q L, et al. Applying analytical hierarchy process to assess eco-environment quality of Heilongjiang Province[J]. Environmental Science, 2006, 27(5): 1031–1034

[24] 危向峰, 段建南, 胡振琪, 等. 层次分析法在耕地地力评价因子权重确定中的应用[J]. 湖南农业科学, 2006(2): 39–42
Wei X F, Duan J N, Hu Z Q, et al. Applying of analytic hierarchy process to determining farmland productivity evaluation factors' weight[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2006(2): 39–42